



تحليل البيانات الفضائية بطريقتي انحدار المربعات الصغرى والانحدار المكاني الموزون لتقدير الفسفور المتاح في ترب المنطقة الغربية من محافظة حماة / سورية

Remote Sensing Data Analysis Using Least Ordinary Squared and Geographically Weighted Regressions to Estimate the Available Soil Phosphorus in the Western Region of Hamah Governorate/Syria

سمير شمشم⁽³⁾

يونس إدريس⁽⁴⁻²⁾

علاء خلوف⁽¹⁾

Alaa Khallouf⁽¹⁾

Younes Idriss⁽²⁻⁴⁾

Sameer Shamsham⁽³⁾

alaakhallouf@gmail.com

younes.idriss@gmail.com

sshamsham@hotmail.com

(1) الهيئة العامة للبحوث العملية الزراعية، دمشق، سورية.

(1) General Commission for Scientific Agricultural Research (GCSAR), Damascus, Syria.

(2) الهيئة العامة للاستشعار عن بعد، دمشق، سورية.

(2) General Commission of Remote Sensing (GORS), Damascus, Syria.

(3) قسم التربة، كلية الزراعة، جامعة البعث، حمص، سورية.

(3) Department of Soil, Faculty of Agriculture, Al-Baath University, Homs, Syria.

(4) منظمة المركز العربي لدراسات المناطق الجافة والأراضي القاحلة/أكساد.

(4) The Arab Center for the Studies of Arid Zones and Dry Lands (ACSAD).

الملخص

نفذت هذه الدراسة لأول مرة في سورية لبيان إمكانية استخدام كل من انحدار المربعات الصغرى العادية OLS، والانحدار المكاني الموزون GWR، في التنبؤ بالفسفور المتاح في الترب السطحية (0-30 سم) للمنطقة الغربية من محافظة حماة (سورية). أخذت 408 عينات تربة من كامل منطقة الدراسة، وقسمت إلى قسمين: 285 عينة (70 % من كامل عدد العينات) لمعايرة النماذج الرياضية، و123 عينة (30 % من عدد العينات) لتقييم أداء النماذج الرياضية الناتجة. استخدم كل من نموذج الارتفاعات الرقمي لاشتقاق بعض الخصائص الطبوغرافية، وصورة فضائية من نوع Landsat8 OLI بدقة تمييز مكاني 30 م في اشتقاق العديد من النسب والقرائن والتحويلات، بالإضافة إلى المؤشرات المناخية والجيولوجية. بينت النتائج أن الانحدار المكاني الموزون قد أعطى فهماً أعمق للتغيرات في العوامل الطبيعية المؤثرة في التنبؤ بالفسفور المتاح في منطقة الدراسة، إذ تراوح تركيز الفسفور المتاح في منقطة الدراسة بين 2.74 و31.48 مغ/كغ بمعامل تحديد معدل بلغ (R_{2adj}=0.348)، في حين تراوح بين 3.1 و24.1 مغ/كغ في (OLS R_{2adj}=0.266)، وبلغت قيمة الجذر التربيعي لمربع الخطأ RMSE في GWR (3.80)، في حين بلغت 4.193 مغ/كغ في OLS، وأدى الانتقال من انحدار المربعات الصغرى العادية إلى الانحدار الموزون إلى زيادة في دقة التنبؤ والأهمية النسبية بمقدار 9.37 %، مما يدل على إمكانية استخدام الانحدار المكاني الموزون للوصول إلى نتائج أكثر دقة في تقدير الفسفور المتاح في منطقة الدراسة.

الكلمات المفتاحية: انحدار المربعات الصغرى العادية OLS، الانحدار المكاني الموزون GWR، الفسفور المتاح، بيانات استشعارية، معامل تحديد معدل.

©2021 The Arab Center for the Studies of Arid Zones and Dry Lands, All rights reserved. ISSN:2305 - 5243; AIF-181 (p:161 -173)

Abstract

This study was carried out for the first time in Syria by using Least ordinary squired and Geographically 30 cm) in the western-Weighted Regression methods to estimate the available phosphorus in the surface soil (0 region of Hamah governorate (Syria). 408 soil samples were dug and divided into 2 sets: 1- training set (285 soil samples) for P_2O_5 -models calibration, and 2- validation set (123 soil samples) for models fit validation and accuracy calculations. Digital Elevation Model (DEM) with 30 m spatial resolution was used to drive some topographic characteristics, and Landsat8 OLI (30 m spatial resolution) image used for some ratios, indices, and transformations extraction. In addition, some climatic and geological indices were also used to explore the environmental factors that affected in phosphorus prediction models. The results showed that GWR contributes of P_2O_5 prediction models factors, where the P_2O_5 concentration ranges from 2.74 to 31.48 mg/kg ($R^2_{adj}=0.348$, RMSE=3.8 mg/kg), while P_2O_5 concentration based on OLS regression method ranges from 3.1 to 24.1 mg/kg ($R^2_{adj}=0.266$, RMSE= 4.193 mg/kg). The results also showed that using GWR led to improvement of prediction accuracy up to 9.37% of OLS. In conclusion, using GWR is the best method of studied regression methods of P_2O_5 concentration prediction.

Key words: Adjusted R2, Available phosphorus, Geographically Weighted Regression (GWR), Least Ordinary Squired (OLS), Remote sensing data.

المقدمة

يعدّ توفر معلومات دقيقة وتفصيلية عن خصائص التربة حاجة ملحة لمراقبة موارد الأرض الطبيعية، والتطبيقات الهيدرولوجية البيئية، وإدارة استخدام الأرض، وأي شكل من أشكال نمذجة الخصائص البيئية (McBratney و Hartemink، 2008؛ Forkuor وزملاؤه، 2017)، ولذلك فإن معرفة التوزيع المكاني لخصائص التربة تملك أهمية بالغة لاستدامة التربة ضمن مفهوم استدامة الأرض، ولاسيما في ظل ظروف التغيرات المناخية الراهنة (Rodrigo-Comino وزملاؤه، 2018).

تشكل العناصر الغذائية أحد أهم متطلبات نمو النبات وإنتاجيته (Russell، 1973)، بالإضافة إلى ذلك فإن الحفاظ على مستويات كافية من هذه العناصر هي الأساس لاستدامة الإنتاج (Campbell، 1998؛ Kumar وزملاؤه، 2016). وضمن هذا المفهوم، يعدّ الفسفور العنصر الثاني من حيث الأهمية لنمو النبات بعد الأزوت، وأحد أهم العوامل المحددة للإنتاج الزراعي (Olsen و Khasawneh، 1980)، إذ يؤدي الفسفور على الرغم من كميته القليلة في خلية النبات دوراً كبيراً في العمليات الاستقلابية، كما أنه يدخل في تركيب ATP، وهو مركب الطاقة الضروري لامتصاص العناصر الغذائية واصطناع الكثير من المركبات العضوية وفي مقدمتها النشاء (Marschner و Marschner، 2012)، وتتأثر حركية الفسفور بالتربة بعدد من الخصائص الفيزيوكيميائية وبنظام إدارة الأرض، لذلك من المهم جداً الفهم الجيد لطبيعة توزيع الفسفور بهدف تحسين طريقة إدارتها وزيادة إنتاجيتها (Roger وزملاؤه، 2014). تعتمد منهجية مسح التربة التقليدي على المسح الميداني لمنطقة ما، ونادراً ما توفر هذه المنهجية معلومات عن التوزيع المكاني لخصائص التربة على سطح الأرض وفق دقة تمييز مكاني مناسبة (McBratney وزملاؤه، 2003)، بالإضافة إلى ذلك فإن هذه الطريقة تحتاج لوقت طويل وتكلفة عالية، ولاسيما عند تنفيذها على مستوى محلي، أو اقليمي، أو عالمي (Forkuor وزملاؤه، 2017) ولهذا فإنه من الضروري جداً إيجاد طريقة تتصف بالثقة العالية، ولها القدرة على التنبؤ بخصائص التربة، سواءً على مستوى المنطقة، أو على مستوى مقياس المسح المطلوب (Khaledian وزملاؤه، 2017). ونظراً للتطور الكبير في تقانات الاستشعار عن بعد، فقد أصبح بالإمكان التنبؤ بخصائص التربة بدقة عالية باستخدام طرائق مثل خرائط التربة الرقمية Digital Soil Mapping (Minasny و Hartemink، 2011). استخدمت في السنوات الأخيرة هذه الطريقة اعتماداً على خصائص الأرض الطبيعية للتغلب على صعوبات المسح الحقلية الميداني (Taghizadeh-Mehrjardi وزملاؤه، 2016؛ Forkuor وزملاؤه، 2017).

يعدّ انحدار المربعات الصغرى العادي Ordinary Least Squared (OLS) أحد أنواع الانحدار التقليدية العامة والذي يعتمد على نمذجة العلاقة بين المتغير التابع والمتغيرات المستقلة. ومع ذلك فإن هذا النوع من الانحدار لا مكاني (غير مرتبط بالمكان)، أي لا يأخذ بالحسبان أهمية الموقع الجغرافي، ولا يدخل كأحد المتغيرات في عملية النمذجة (Velthof و Oenema، 2010؛ Wallis وزملاؤه، 2010)، وبالتالي فإن أنموذج الانحدار الناتج لا يعكس الخصائص المكانية للعلاقة بين المتغير التابع (الفسفور المتاح) والعوامل المؤثرة في تكوين التربة. بالإضافة لذلك فإن انحدار المربعات الصغرى يعتمد على فرضية الاستقلال المكاني لبيانات العوامل الطبيعية، ليفشل في التعرف على تابعة هذه البيانات عندما تطبقها في عملية تحليل للعوامل الطبيعية المؤثرة (Fotheringham وزملاؤه، 2002؛ Qu وزملاؤه، 2014).

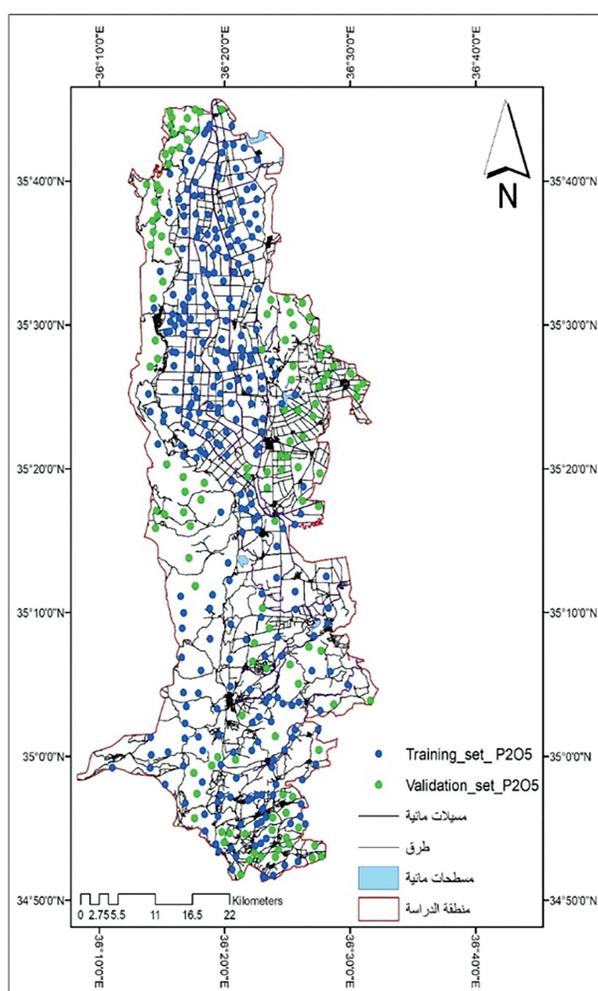
بشكل عام، يتعلق تركيز الفسفور المتاح بعوامل مكانية متعددة، ولهذا فإن بيانات هذه العوامل ذات المسافة الأقرب قد يكون لها ارتباطات أعلى من تلك التي على مسافة بعيدة، وبالتالي فإن النماذج الرياضية المستنتجة وفق انحدار للمربعات الصغرى OLS لربما تتجاهل عن هذه الفروق، لتعطي فقط علاقة تعبر عن المتوسط على كامل المنطقة. بالمقابل، يعد الانحدار المكاني الموزون Geographically weighted regression (GWR) تقانة جديدة نسبياً تعبر عن الانحدار المكاني، إذ يستخدم لاكتشاف علاقات التباين المكاني من خلال تضمين الموقع الجغرافي في علاقة الانحدار الخطي (Foody, 2003; Mishra; وزملاؤه، 2010; Wang; وزملاؤه، 2012). ولذلك فإن GWR من أهم الأدوات التي تظهر علاقات التباين المكاني بين الفسفور المتاح وعوامله المؤثرة في تركيزه في نقطة ما في منطقة الدراسة. تعد دراسات وضع الخرائط الرقمية لخصائص التربة قليلة نسبياً في سورية على الرغم من أهميتها، إذ استخدم بهلوان (2010) الانعكاسية الطيفية لتقدير الجبس في تربة حوض مسكنة شرقي حلب (سورية)، ووضعت هنيدي وزملاؤها (2014) أنموذجاً رياضياً لتقدير كربونات الكالسيوم في محافظة دير (سورية) باستخدام جهاز سبيكتروراديو متر وبيانات من صور فضائية Landsat ETM7، وتعد هذه الدراسة الأولى من نوعها في استخدام الانحدار المكاني الموزون في تقدير الفسفور المتاح باستخدام طريقتي OLS وGWR.

هدف البحث:

تتلخص أهداف البحث في الآتي:

- 1 - المقارنة بين قدرة انحدار المربعات الصغرى العادية (OLS)، والانحدار المكاني الموزون (GWR) في تفسير التباين في قيم الفسفور المتاح في منطقة الدراسة.
- 2 - وضع الخارطة الرقمية للفسفور المتاح لمنطقة الدراسة اعتماداً على البيانات الحقلية وبيانات الاستشعار عن بعد.

مواد البحث وطرائقه



الشكل 1. منطقة الدراسة وتوزع النقاط الحقلية فيها.

1- الموقع والامتداد:

تقع منطقة الدراسة في الجهة الغربية من محافظة حماة (سورية)، بين خطي طول $36^{\circ} 18' 7.94''$ و $36^{\circ} 23' 16.32''$ شرقاً، ودائرتي عرض $34^{\circ} 50' 26.56''$ و $35^{\circ} 45' 50.14''$ شمالاً، موزعة على منطقتي الغاب ومصيف، ويوضح الشكل 1 امتداد منطقة الدراسة. تبلغ مساحة منطقة الدراسة نحو 1910 كم²، منها 1108 كم² في منطقة الغاب، و801 كم² في منطقة مصيف. ويتراوح ارتفاعها عن سطح البحر ما بين 88 و1444 م، وهي منطقة متنوعة في تضاريسها ما بين المناطق السهلية ذات الانحدار الخفيف والجبال عالية الارتفاع، شديدة الانحدار، إذ تتراوح درجة الانحدار ما بين 0 إلى 72.1°.

2 - جمع عينات التربة وتحليلها:

تم جمع 408 عينات تربة من الطبقة السطحية بعمق (0-30 سم) من منطقة الدراسة خلال المدة من 8/1 إلى 2020/10/23، وأخذ موقعها الجغرافي باستخدام جهاز تحديد المواقع العالمي GPS (الشكل 1). جففت العينات هوائياً، ثم طحنت ونخلت على منخل 2 مم، ثم قُدِّر فيها الفسفور المتاح في مخبر بحوث حمص التابع للهيئة العامة للبحوث العلمية الزراعية، إذ تم استخلاص الفسفور المتاح وفق طريقة أولسن Olsen باستخدام محلول من بيكربونات الصوديوم عيارية 0.2 N (Olsen وزملاؤه، 1954). وتم إظهار اللون الأزرق بإضافة موليبيدات الأمونيوم، والقياس بواسطة جهاز المطياف الضوئي Spectrophotometer على طول موجة 660 نانومتر.

3 - البيانات الاستشعارية المستخدمة:

- الخصائص الطبوغرافية: تم استخدام أنموذج الارتفاعات الرقمي DEM بدقة مكانية 30 م، في حين استخدم برنامج SAGA-GIS في استخراج بعض الخصائص الطبوغرافية، ومنها الارتفاع عن سطح البحر Elevation، والانحدار Slope، واتجاه المنحدر Aspect، وطوله (Length of slope (LS)، والانحناء Curvature، ومؤشر الموقع الطبوغرافي (Topographic position index (TPI)، وعمق الوادي Valley depth، ومؤشر المنخفضات المغلقة. Closed depressions.

- النسب والتحويلات والقرائن: استخدمت صورة فضائية من نوع Landsat8 OLI ملتقطه بتاريخ 2020/8/24 وبدقة تمييز مكاني 30 م، إذ استخدمت النطاقات الطيفية Bands من 1 إلى 7 في استخراج النسب والتحويلات والقرائن، وفق الآتي:

نسب النطاقات: وتدل على ناتج القسمة لقيم pixels في أحد النطاقات على القيم المقابلة لها في نطاق آخر (Kieffer و Lilesand، 1994)، ومن ميزات هذه الطريقة أنها تبقى على الخصائص الطبوغرافية لسمات الصورة بصرف النظر عن التغيرات في إضاءة المشهد، كما أنها تساعد على تصحيح التداخل الناتج عن عوامل الطبوغرافية، بالإضافة لتعزيزها للمحتوى اللوني للمعطيات (قرموقة، 2018). وتضم، الآتي:

• النسب البسيطة **Simple Ratios**: وفيها يتم حساب النسبة المباشرة بين نطاقين طيفيين من نطاقات الصورة، وبذلك تم استخراج 42 نطاقاً طيفياً.

• النسب المركبة **Complex Ratios**: وتتضمن العمليات الحسابية، إما الجمع أو الطرح أو الضرب لنطاقين طيفيين والقسمة على نطاق طيفي منفرد، وبذلك تم الحصول على 196 نطاقاً طيفياً لعملية الجمع، و294 نطاقاً للطرح، و147 نطاقاً للضرب. وبذلك يكون المجموع الكلي لجميع النسب هو 679 نطاق طيفي.

• تحليل المكونات الأساسية **Principal Component Analysis (PCA)**:

هي طريقة تهدف إلى تحويل البيانات الكبيرة ومبعثرة الخصائص إلى بيانات تحتوي المكونات الأساسية للصورة بشكل منظم (Su وزملاؤه، 2008)، وبذلك تم استخراج 7 نطاقات طيفية للنطاقات الطيفية من 1 إلى 7.

- القرائن **Indices**: وضمت كل من

القرائن النباتية:

قرينة النبات التفاضلية **Normalized Difference Vegetation Index (NDVI)**

$$NDVI = (B5 - B4) / (B5 + B4) \quad (1974, \text{ Rouse و زملاؤه})$$

قرينة النبات المحولة **Transformed Vegetation Index (TVI)**:

$$TVI = [(0.5 + ((B5 - B4) / (B5 + B4)))^{0.5}] \quad (2014, \text{ Weicheng})$$

حيث: B5: الانعكاسية في النطاق الطيفي تحت الأحمر القريب، B4: الانعكاسية في النطاق الطيفي الأحمر.

قرينة المحتوى المائي **Normalized difference Water index (NDWI)**:

$$NDWI = (B5 - B6) / (B5 + B6) \quad (1980, \text{ Tucker})$$

حيث: B6 النطاق الطيفي تحت الأحمر قصير الموجة.

قرائن التربة:

قرينة النبات المضبوطة على التربة **Soil Adjusted Vegetation Index (SAVI)**

$$SAVI = (B5 - B4) / (B5 + B4 + L) * (1 + L) \quad (1988, \text{ Huete})$$

حيث: L معامل معايرة، وحددت قيمته في المعادلة (L=0.5).

القرينة المحسنة للنبات المضبوطة على التربة **Other Soil Adjusted Vegetation (OSAVI)**

$$OSAVI = (B5 - B4) / (B5 + B4 + 0.16) \quad (1988, \text{ Huete})$$

قرينة النبات المعدلة على التربة **Modified Soil Adjusted Vegetation Index (MSAVI)**

$$MSAVI = \frac{1}{2} [2(B5 + 1) - ((2 * B5 + 1)^2 - 8(B5 - B4))^{0.5}] \quad (1994, \text{ Qi و زملاؤه})$$

قرينة النبات المحولة على التربة **Transformed Soil Adjusted Vegetation Index (TSAVI)**

$$TSAVI = (B5 - B4 - 0.1) / (B5 + B4 - 0.09) \quad (1989, \text{ Baret و زملاؤه})$$

- الخصائص المناخية: تم استخدام كل من شرائح MODIS بدقة تمييز مكاني 250 م لكل من الهطل المطري، والحرارة المتوسطة، والحرارة العظمى المطلقة، والحرارة الصغرى المطلقة.

- الخصائص الجيولوجية: تم استخدام الخارطة الجيولوجية لمنطقة الدراسة بعد تحويلها إلى Raster، باستخدام برنامج ArcGIS، بالإضافة

لذلك استخدمت المؤشرات الجيولوجية:

مؤشر كربونات الكالسيوم (CaCO_3 index):

$$\text{CaCO}_3 \text{ index} = B6 / B7$$

مؤشر أكاسيد الحديد (Ferric oxidation):

$$\text{Ferric oxidation index} = B4 / B2 \quad (2009, \text{Dogan})$$

حيث: B4 النطاق الطيفي للون الأحمر، وB2: النطاق الطيفي للون الأزرق.

مؤشر سيليكات الحديد (Ferrous silicates index):

$$\text{Ferrous silicates index} = B7 / B6$$

استخدمت الأداة Exploratory regression في تحديد الخصائص الطبيعية والبيانات الاستشعارية الداخلة في عملية التنبؤ لكل من OLS و GWR (ESRI، 2014)، إذ يبين الجدول 1 الخصائص والبيانات الاستشعارية الداخلة في النموذج الرياضي، بالإضافة لذلك درست علاقة الارتباط بين هذه الخصائص مع قيم الفسفور المتاح.

الجدول 1. الخصائص والبيانات الاستشعارية الداخلة في النموذج الرياضي.

المجموعة	خصائص الأرض والبيانات الاستشعارية	الارتباط مع قيم الفسفور المتاح
النطاقات الطيفية	B3	0.376**
الخصائص الطبوغرافية	TPI	0.220-**
الخصائص المناخية	Minimum temperature	0.204-**
الخصائص الجيولوجية	Ferric oxidation index	0.218**

** معنوي عند مستوى 1%

التحليل الإحصائي الوصفي Descriptive Statistics:

استخدم البرنامج SPSS في تحديد معايير التحليل الوصفي Descriptive statistics لكل من الفسفور المتاح، وتضمنت كل من المتوسط Mean، والقيمة الدنيا Minimum، والقيمة العظمى Maximum، والانحراف المعياري Standard deviation، ومعامل الاختلاف Coefficient of variation، والالتواء Skewness، والتفلطح Kurtosis. ويحدد معامل الاختلاف التباين في البيانات، ويصنف عادةً إلى تباين منخفض ($CV\% > 15$)، وتباين متوسط ($CV\%: 15-35$)، وتباين عال ($CV\% < 35$) (Wilding، 1985). كما درس التوزيع الطبيعي وذلك استناداً على منحني التوزيع الطبيعي Histogram، وقيم كل من الالتواء والتفلطح، إذ يجب أن تتراوح قيم الالتواء بين -1 و+1، في حين تتراوح قيم التفلطح بين -3 و+3 حتى يكون التوزيع طبيعياً.

النموذج الرياضي للفسفور المتاح باستخدام OLS:

يعد OLS أحد أنواع الانحدار التقليدية، والذي يفترض أن العلاقة بين المتغير التابع والمتغيرات المستقلة هي علاقة ثابتة في كل مكان، ويمكن أن يعبر عنها بالعلاقة:

$$Y = B_0 + B_1X_1 + B_2X_2 + \dots + B_nX_n + 3 \quad (1)$$

حيث: Y المتغير التابع، X_1, X_2, \dots, X_n المتغيرات المستقلة، 3 البواقي.

ويتصف النموذج الرياضي للانحدار OLS بأنه لا مكاني، إذ لا يدخل الموقع الجغرافي كأحد المعايير في معادلة الانحدار، ويمكن تقييم أداء النموذج الرياضي الناتج من خلال التحقق من ستة نقاط كما أوضحتها ESRI (2014):

1 - يحكم على أداء النموذج الرياضي من خلال قيمة معامل التحديد المعدل R^2_{Adj} (R^2_{Adj})، والذي تتراوح قيمته بين 0 و1، وعادة ما يكون أقل من قيمة معامل التحديد (R^2) Coefficient of Determination لأنه يعكس درجة تعقيد النموذج من حيث عدد المتغيرات المستقلة الداخلة في النموذج، وبالتالي يعد أكثر دقة في الحكم على أداء النموذج من معامل التحديد R^2 .

2- قدرة المتغيرات المستقلة الداخلة في النموذج على تفسيره، ويتم ذلك من خلال التحقق من كل من المعامل Coefficient لكل متغير مستقل، وقيمة الاحتمالية Probability or Robust Probability، وقيمة عامل تضخم التباين Variance Inflation Factor (VIF). إذ يعكس Coefficient نوع وقوة العلاقة بين المتغيرات المستقلة في النموذج والمتغير التابع، ويعبر عن درجة التغيير في المتغير التابع لكل

درجة تغيير في المتغير المستقل مع اعتبار بقية المتغيرات المستقلة ثابتة. وعادة ما يستخدم اختبار T في تحديد معنوية المعامل Coefficient، إذ تفترض فرضية العدم أن قيمة معامل المتغير المستقل = 0، ولذلك وجود × بجوار قيمة Probability or Robust Probability يدل على معنوية المعامل عند مستوى 1%. ويقاس VIF الزيادة في عدد المتغيرات المستقلة الداخلة في النموذج، إذ أن المتغيرات المستقلة ذات قيمة VIF أكبر من 7.5 تعد زائدة في النموذج، ولا تضيف أي تفسير جديد له، ولذلك يجب إزالتها.

3 - تقييم المعنوية الكلية للنموذج الرياضي Overall Model Statistical Significance، ويستخدم لهذا الغرض أحد الاختبارين Joint F-Statistic and Joint Wald Statistic، ويكفي التأكد من معنوية Joint F-Statistic للدلالة على معنوية النموذج ككل عندما يكون اختبار Koenker (BP) statistic غير معنوي، في حين يجب التأكد أيضاً من معنوية Joint Wald Statistic في حال كان Koenker (BP) statistic معنوياً.

4 - اختبار الثباتية Koenker (BP) statistic، ويدل هذا الاختبار فيما إذا كانت العلاقة بين المتغيرات المستقلة في النموذج مع المتغير التابع تتصف بالثباتية على المستوى الجغرافي Geographic space، وعلى مستوى البيانات Data space، وعندما يتمتع النموذج الناتج بالثباتية على مستوى الحيز الجغرافي فإن العمليات المكانية Spatial processes يمكن تفسيرها تماماً بواسطة المتغيرات المستقلة في النموذج، وتكون ذات سلوك متشابه في كل مكان من منطقة الدراسة، وبالتالي تكون هذه العمليات متناسقة وثابتة. وعندما يتصف النموذج بالثباتية على مستوى البيانات فإن التغيرات في العلاقة بين القيم المتوقعة وكل متغير مستقل في النموذج لا تتغير بتغير قيمة المتغير المستقل، مما يدل على عدم تجانس في النموذج. وتفترض فرضية العدم لهذا الاختبار بأن النموذج الرياضي يتصف بالثباتية عندما تكون قيمة (p-value) أقل من 0.05 لتدل على عدم تجانس مع / أو عدم ثباتية. وبشكل عام يعد النموذج الرياضي الذي يتصف بعدم الثباتية مرشحاً جيداً لتحليل GWR.

5 - اختبار انحياز النموذج Model bias، ويتم ذلك من اختبار Jarque-Bera statistic، والذي يدل فيما إذا كانت البواقي تتوزع بشكل طبيعي. وتعد فرضية العدم لهذا الاختبار أن البواقي تتوزع طبيعياً، وبالتالي فإن قيم (p-value) أقل من 0.05، وتشير إلى أن البواقي لا تتوزع طبيعياً، وبالتالي انحياز النموذج الناتج، أي أنه يعمل على التنبؤ بقيم أقل Under Prediction، أو قيم أعلى Over prediction. وينتج هذا التحيز عند وجود نقص في أحد المتغيرات المستقلة الأساسية في النموذج، وتسمى هذه الحالة بالتحديد الخاطئ Misspecification، وبالتالي لا يمكن الوثوق بهذا النموذج.

6 - تقييم استقلالية البواقي Residual Spatial Autocorrelation، ويتم عادة باستخدام الأداة Spatial Autocorrelation (Moran's I)، بهدف التأكد من التوزيع العشوائي للبواقي Random، في حين أن تجمع البواقي Clustering يدل على Misspecification، وبالتالي لا يمكن الوثوق بهذا النموذج.

- النمذجة الرياضية للفوسفور المتاح باستخدام GWR:

يختلف GWR عن OLS بأنه يأخذ بالحسبان موقع عينات التربة، مما يسهم في اختلاف المعايير الداخلة في النموذج مكانياً، ما يعكس بشكل أفضل العلاقة المكانية المتغيرة بين المتغير التابع والمتغيرات المستقلة. ويمكن التعبير عن هذه العلاقة (Fotheringham وزملاؤه، 2002):

$$Y(u) = B_0(u) + B_1(u)X_1(u) + B_2(u)X_2(u) + \dots + B_n(u)X_n(u) + \epsilon(u) \quad (2)$$

حيث: Y المتغير التابع في الموقع u، X1, X2, ..., Xn المتغيرات المستقلة في الموقع u، B0(u), B1(u), Bn(u) هي على التوالي ثابت الانحدار ومعاملات المتغيرات المستقلة في الموقع u، $\epsilon(u)$ البواقي في الموقع u.

يتم عادة استخدام طريقتين لتحديد الوزن المكاني Spatial Weight إما باستخدام طريقة Gaussian، أو بطريقة Bi-square، إذ استخدمت في هذه الدراسة أداة Adaptive Gaussian kernel، وهي الطريقة المفضلة عند عدم وجود انتظام في التوزيع المكاني لعينات التربة (Brunsdon وزملاؤه، 1996؛ Kumar، 2015)، بالإضافة لذلك فإن GWR يتأثر بوضوح بالطريقة المستخدمة لتحديد قيمة Bandwidth Shabrina (وزملاؤه، 2020)، ولذلك استخدم المعيار Corrected Akaike information criterion (AICc) لتحديد قيمة Bandwidth، إذ يقوم المبدأ على تقليل هذه القيمة أكثر ما يمكن مما يساعد على تقييم إذا ما كان GWR قادراً على التعبير عن البيانات ومحاكاتها بطريقة أفضل من الانحدار الخطي MLR.

- تقييم دقة وكفاءة أداء النماذج Model Validation and Evaluation:

استخدم في تقييم أداء النماذج الرياضية المستنتجة 123 عينة تربة (تمثل 30% من عدد العينات الكلية)، وحسبت كفاءتها اعتماداً على معامل التحديد Coefficient of Determination (R²)، ومعامل التحديد المعدل Adjusted R² (R²_{Adj})، ومتوسط الخطأ المطلق MAE، والجذر التربيعي لربع الخطأ (RMSE) Root Mean Square Error، ودقة التنبؤ Prediction Accuracy (Acc)، كما توضحها المعادلات:

$$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - y_i)^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2} \quad (3)$$

$$R^2_{adj} = 1 - [(n-1)/(n-k-1)] * (1 - R^2) \quad (4)$$

$$MAE = \frac{\sum_{i=1}^n |\hat{y}_i - y_i|}{n} \quad (5)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{n}} \quad (6)$$

$$ACC = [1 - (1/n) \sum_{i=1}^n |\hat{y}_i - y_i|] \quad (7)$$

حيث: y_i : القيم المقدرة، \hat{y}_i : القيم المتوقعة، y' : متوسط القيم المقدرة، K : عدد المتغيرات، n : عدد النقاط الداخلة في النموذج. وتحسب الأهمية النسبية RI من خلال العلاقة (Mishra وزملاؤه، 2009):

$$RI\% = (RMSE_{OLS} - RMSE_{GWR} / RMSE_{OLS}) * 100$$

• مؤشر كربونات الكالسيوم $CaCO_3$ index = $B6/B7$

• مؤشر سيليكات الحديد Ferrous silicates index = $B7/B6$

• قرينة المحتوى المائي (NDWI) Normalized difference Water index

$$NDWI = (B5 - B6) / (B5 + B6) \quad (1980, Tucker)$$

النتائج والمناقشة

- التحليل الوصفي

يوضح الجدول 2 التحليل الوصفي لكل من عينات التربة (Training set) الداخلة في عملية وضع النماذج الرياضية وعددها 285 عينة، وعينات التربة (Validation set) المستخدمة في تقييم كفاءة النماذج الرياضية المستتجة وعددها 123 عينة. ويظهر أن قيم الفسفور المتاح في تربة منطقة الدراسة بلغت 2.0 و 34.2 ملغ/كغ ويمتوسط قدره 14.88 ملغ/كغ، وبانحراف معياري Std. Deviation = 6.876 ملغ/كغ. وكذلك يبين الجدول أن قيم الالتواء لمنحنى التوزيع الطبيعي كانت 0.534 وقيمة التفلطح -0.248، مما يدل على أن قيم الفسفور المتاح قد توزعت طبيعياً في كامل منطقة الدراسة. كما يلاحظ وجود تشتت كبير بالبيانات، إذ بلغت قيمة معامل التباين $CV\% = 46.16\%$ ، وقد يعود ذلك إلى اختلاف طبيعة أنواع التربة في منطقة الدراسة، وهذا ما يتوافق مع Wang وزملاؤه (2009).

الجدول 2. التحليل الاحصائي الوصفي لقيم الفسفور المتاح في منطقة الدراسة.

Kurtosis	Skewness	%CV	Variance	Std. Deviation	Mean (mg/kg)	Max (mg/kg)	Min (mg/kg)	N	Soil macro-nutrients
-0.248	.534	46.16	47.281	6.876	14.88	34.2000	2.0000	285	P_2O_5 (Training set)
4.530	1.801	80.63	119.684	10.940	13.08	66.80	1.00	123	P_2O_5 (Validation set)

النمذجة الرياضية للفسفور المتاح حسب SLO:

تم باستخدام الأداة Ordinary Least Squares (OLS) وضع النموذج الرياضي للتنبؤ بقيم الفسفور المتاح (الشكل 2) اعتماداً على الخصائص الطبيعية والبيانات الاستشعارية الموضحة في الجدول 3، ويوضح الجدول نفسه الخصائص الأساسية لهذا النموذج.

الجدول 3. الخصائص الاحصائية الأساسية للنموذج الرياضي وفق OLS.

VIF	RobuSt_Pr	RobuSt_t	Probability	t-Statistic	المعامل Coefficient	المتغير المستقل
-----	0.002150**	3.098932	0.005643**	2.789527	13.675280	intercept
1.048344	0.000000**	5.291827	0.000000**	6.493010	95.617153	B3
1.063330	0.000109**	-3.944287	0.000335**	-3.640906	-0.366439	TPI
1.078055	0.008743**	-2.640367	0.006221**	-2.756808	-1.105922	Minimum temperature
1.044192	0.016608**	2.409541	0.009426**	2.614115	3.608209	Ferric oxidation index

** معنوي عند مستوى معنوية 1%.